

Г. В. БЕЗПРОЗВАННИХ, О. Г. КЕССАЄВ, І. Ю. ГАВРИЛЮК

СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ З ВІЗУАЛІЗАЦІЄЮ ПРОЦЕСУ ПОЛЯРИЗАЦІЇ АКТИВНИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Розроблено стенд для дослідження електричних властивостей з можливістю візуалізації процесу поляризації та визначення діелектричних втрат в зразках конденсаторів з пасивним і активним діелектриком. Лабораторний стенд включає джерело змінного струму, цифровий двоканальний осцилограф з програмним забезпеченням, ноутбук, професійний портативний вимірювач індуктивності, опору і ємності. Виконано тестування лабораторного стенду з обов'язковим калібруванням осцилографа. Отримано осцилограми напруженості електричного поля, поляризації і петлі діелектричного гістерезису для зразків конденсаторів з активним діелектриком. Показано, що залежності істотно відрізняються для різних матеріалів, що застосовуються в якості діелектрика конденсатора. Виконано дослідження частотних залежностей ємності і тангенса кута діелектричних втрат конденсаторів з пасивним і активним діелектриком.

Ключові слова: активні діелектрики, сегнетоелектрики, домени, спонтанна поляризація, петля діелектричного гістерезису, діелектричні втрати, діелектрична проникність, ємність, стенд, тестування, калібрування, конденсатор, частотні залежності.

А. В. БЕСПРОЗВАННЫХ, А. Г. КЕССАЕВ, И. Ю. ГАВРИЛЮК

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ С ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ПРОЦЕССА ПОЛЯРИЗАЦИИ АКТИВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Разработан стенд для исследования электрических свойств с возможностью визуализации процесса поляризации и определения диэлектрических потерь в образцах конденсаторов с пассивным и активным диэлектриком. Лабораторный стенд включает источник переменного тока, цифровой двухканальный осциллограф с программным обеспечением, ноутбук, профессиональный портативный измеритель индуктивности, сопротивления и емкости. Выполнено тестирование лабораторного стенда с обязательной калибровкой осциллографа. Получены осциллограммы напряженности электрического поля, поляризации и петли диэлектрического гистерезиса для образцов конденсаторов с активным диэлектриком. Показано, что зависимости существенно отличаются для различных материалов, применяемых в качестве диэлектрика конденсатора. Выполнены исследования частотных зависимостей емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов с пассивным и активным диэлектриком.

Ключевые слова: активные диэлектрики, сегнетозелектрики, домены, спонтанная поляризация, петля диэлектрического гистерезиса, диэлектрические потери, диэлектрическая проницаемость, емкость, стенд, тестирование, калибровка, конденсатор, частотные зависимости.

G. BEZPROZVANNYCH, O. KIESSAIEV, I. HAVRYLYUK

PECULIARITIES INVESTIGATION OF THE USING ENERGY ACCUMULATION SYSTEMS AT THE TRADERS WORK ON THE ENERGY MARKET OF UKRAINE

A stand has been developed for studying electrical properties with the ability to visualize the polarization process and determine the dielectric loss in samples of capacitors with a passive and active dielectric. The laboratory bench includes an AC source, a digital two-channel oscilloscope with software, a laptop, a professional portable meter of inductance, resistance and capacitance. The laboratory bench was tested with the required calibration of the oscilloscope. Oscillograms of the electric field strength, polarization, and dielectric hysteresis loop for samples of capacitors with an active dielectric are obtained. It is shown that the dependences are significantly different for different materials used as a dielectric of a capacitor. The frequency dependences of the capacitance and the tangent of the dielectric loss angle of capacitors with a passive and active dielectric are studied.

Keywords: active dielectrics, ferroelectrics, domains, spontaneous polarization, dielectric hysteresis loop, dielectric loss, permittivity, capacitance, stand, testing, calibration, capacitor, frequency dependencies.

Вступ. Для сучасної техніки важливе значення набувають властивості твердих діелектричних матеріалів, що дозволяє використовувати їх для перетворення енергії або інформації. Широко використовується так звані активні діелектрики, параметри яких можна регулювати, змінюючи, наприклад, напруженість електричного поля, температуру, механічне напруження [1 - 3].

На відміну від пасивних діелектриків, від яких вимагається стабільність властивостей, вимоги до активних абсолютно протилежні: чим сильніше змінюються його властивості при зовнішніх впливах, тим краще активний елемент може виконувати функції управління енергією або її перетворення. Активні діелектрики дозволяють здійснити генерацію, посилення, модуляцію електричних і оптичних

сигналів, а також запам'ятовування і перетворення інформації [1 - 5].

Слід зазначити, що чіткої межі між активними і пасивними діелектриками не існує. Іноді один і той же матеріал в різних умовах експлуатації може виконувати пасивні функції (ізолятора, конденсатора) або активні функції елемента керування, перетворення [6 - 9].

До числа активних діелектриків відносять: пьезо-, піро-, сегнетоелектрики; електрети; рідкі кристали; матеріали лазерної електроніки; електро-, магніто- і акустооптичні матеріали; діелектричні кристали з нелінійними оптичними властивостями і інші матеріали. Властивостями активних діелектриків можуть володіти не тільки тверді, але також рідкі і

навіть газоподібні речовини (наприклад, активне середовище газових лазерів) [1 - 3].

Так, наприклад, п'єзокераміка застосовується в малогабаритних мікрофонах, телефонах, гучномовцях (високочастотних), детонаторах (для зброї), різних пристроях підпалу в газових системах. П'єзокерамічні елементи можна використовувати в якості датчиків тиску, деформацій, прискорень і вібрацій. Подвійне перетворення енергії (електричної в механічну і навпаки) покладено в основу роботи п'єзореzonансних фільтрів, ліній затримки і п'єзотрансформаторів [1 - 3].

Особливістю кристалічних активних діелектриків, в котрих іони різного знаку розташовані в певному порядку, є прояв поляризації навіть при відсутності зовнішнього електричного поля. [В лінійних діелектриках така поляризація не відбувається, тому що внутрішнє електричне поле, що створюється зв'язаними зарядами, компенсується полем вільних зарядів [7 - 9].] Порушення такої компенсації, що призводить до часової появи електричного поля в кристалі, відбувається в п'єзоелектриках (при відповідних деформаціях) та в піроелектриках (при зміні температури кристалу).

Наведена в зовнішньому полі поляризація може довго зберігатися в діелектриках (наприклад, в полімерах та кераміці) після зняття електричного поля (так звані електрети) [1 - 3].

При використанні таких активних матеріалів необхідне знання комплексу їх властивостей, що дозволяють використовувати їх при різних умовах експлуатації.

Проблема дослідження електричних властивостей активних діелектриків. Особливості структури сегнетоелектриків. Сегнетоелектрики є різновидністю піроелектриків, що володіють в певному інтервалі температур спонтанною поляризацією, а також нелінійною залежністю поляризації від напруженості прикладеного електричного поля [2, 4].

При відсутності зовнішнього електричного поля окремі ділянки структури сегнетоелектриків мають власні електричні моменти, викликані зміщенням іонів або полярних груп атомів. Моменти сусідніх ділянок взаємно орієнтуються в одному напрямку в межах макроскопічної області, званої доменом. Лінійні розміри доменів складають від 1 мкм до 1 мм [2, 4]. Напрямок електричних моментів у різних доменів різний. В результаті сумарний вектор поляризації зразка в цілому дорівнює нулю. Звичайні (пасивні) діелектрики не мають таких областей. Тільки дуже дрібні кристали можуть бути одно доменними [2, 4].

Зовнішнє електричне поле змінює напрямки електричних моментів доменів, відбувається процес зародження і зростання нових доменів за рахунок зміщення доменних меж. В результаті відбувається переорієнтація вектора спонтанної поляризації в напрямку зовнішнього поля. Це створює ефект дуже сильної поляризації і обумовлює надвисокі значення діелектричної проникності сегнетоелектриків (до сотень тисяч) [2, 4]. Залежність поляризації P від напруженості електричного поля E – нелінійна і при циклічній зміні E має вигляд петлі діелектричного

гістерезису. Напруженість поля E_c , при якій відбувається зміна напрямку вектора поляризації, є коерцитивною силою. Діелектричний гістерезис зумовлений незворотним зміщенням доменних меж під дією поля і свідчить про додаткові витрати енергії, пов'язаних з орієнтацією доменів [2, 4]. Залишкова поляризація P_r і коерцитивна сила E_c залежать від природи діелектрика і визначаються факторами, що впливають на рух доменних стінок, – розміром кристалітів, наявністю домішок і дефектів [5]. Площа петлі гістерезису пропорційна енергії, що розсіюється в діелектрику за один період. Сегнетоелектрики характеризуються великим значенням тангенса кута діелектричних втрат ($\tan \delta \geq 0.1$) [2, 4].

Наявність петлі діелектричного гістерезису є основною властивістю сегнетоелектриків, що відрізняє їх від інших класів діелектриків [2, 4].

Іншим характерним параметром сегнетоелектриків є сегнетоелектрична точка Кюрі – температура T_c , при якій виникає (при охолодженні) або зникає (при нагріванні) спонтанна поляризація, а діелектрична поляризація досягає свого максимального значення [2, 4]. Після досягнення точки Кюрі доменна структура розпадається і сегнетоелектрик переходить в пароелектричний стан. Це супроводжується різким зменшенням $\tan \delta$, оскільки зникають втрати на гістерезис [2, 4]. У цій точці відбувається фазовий перехід з полярного стану в неполярний. Величина спонтанної поляризації зазвичай сильно залежить від температури в області фазового переходу і в самій точці переходу зникає або стрибком (фазовий перехід першого роду, наприклад в титанаті барію BaTiO_3), або безперервно (фазовий перехід другого роду, наприклад в сегнетовій солі) [2, 4]. З наближенням до точки Кюрі діелектрична проникність різко зростає. Сильна температурна залежність (в полярній і неполярній фазах) спостерігається не тільки у діелектричній проникності, а і у п'єзоелектричних та інших термодинамічних коефіцієнтів сегнетоелектриків. З наближенням до точки Кюрі діелектрична проникність ϵ різко зростає. При температурах вище точки Кюрі залежність діелектричної проникності від температури підкоряється закону Кюрі-Вейсса [2, 4].

Для характеристики властивостей сегнетоелектриків в різних умовах роботи застосовують статичну діелектричну проникність та диференційну діелектричну проникність, котра залежить від значення напруженості зовнішнього поля [2, 4]. В лінійних діелектриках статична і диференційна діелектрична проникність не залежать від напруженості електричного поля (за певних умов: в області сильних електричних полів) і дорівнюють одна одній [7, 8].

Сегнетоелектрики застосовуються для виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів з великою питомою ємністю; діелектричних підсилювачів, модуляторів та інших керованих пристроїв на основі нелінійної залежності поляризації; в лічильно-обчислювальній техніці в якості елементів пам'яті; використання кристалів

сегнето- і антисегнетоелектриків для модуляції і перетворення лазерного випромінювання; виготовлення п'єзо- і піроелектричних перетворювачів [2, 4].

Метою статті є розробка стенду для дослідження електричних властивостей з можливістю візуалізації процесу поляризації осцилографічним методом та визначенням діелектричних втрат в зразках конденсаторів з активним діелектриком.

Характеристика стенду. Конструктивно лабораторний стенд складається з двоканального осцилографа VDS OWON; ноутбука (PC) з програмним забезпеченням; джерела змінної напруги В-4; вимірювача ємності і тангенса кута діелектричних втрат RLC Meter DE-5000; з'єднувальних кабелів; зразків конденсаторів з лінійним і активним діелектриком.

Розроблений стенд забезпечує візуалізацію залежності між напругою, що прикладається до зразка активного діелектрику, та електричним зарядом, тобто між напруженістю електричного поля та вектором поляризації (рис. 1); отримання частотних залежностей електричної ємності та тангенса кута діелектричних втрат в зразках конденсаторів з активним (нелінійним) та пасивним (лінійним) діелектриком [10].

Випрямляч В-24 здійснює перетворення змінного електричного струму частотою 50 Гц і напругою 220 В в змінний струм з плавно регульованою напругою від 0 до 30 В і силою струму до 10 А, а також в випрямлений струм з плавно регульованою напругою від 0 до 24 В і силою струму до 10 А. Максимальна потужність, споживана випрямлячем, може досягати 500 Вт.

Цифровий вимірювач RLC являє собою високоточний вимірювач параметрів LCR з подвійним дисплеєм і працює в режимі автоматичного вибору діапазону повного опору змінного струму та опору постійного струму. Параметри вимірюються на частоті: 100 Гц; 120 Гц; 1 кГц; 10 кГц; 100 кГц. Виміряні дані можна передавати в комп'ютер через опціональний повністю оптично-ізолюваний інфрачервоний інтерфейс USB-IR.

Спостереження кривої поляризації відбувається за допомогою відомої схеми Соєра – Тауєра [7-8].

Блок-схема стенду по дослідженню електричних властивостей діелектриків представлено на рис. 1.

Розроблений стенд дозволяє візуалізувати залежність заряду від напруги $q(U)$ (вектора поляризації від напруженості електричного поля $P(E)$) осцилографічним методом. На перший канал осцилографа (розгортка по вертикалі (вхід «Y»)) подається напруга U_x , пропорційна величині заряду q (або поляризації P). На другий канал (розгортка по горизонталі) (вхід «X») – напруга U_y , пропорційна величині напруги U_c , на конденсаторі, що досліджується (рис. 2).

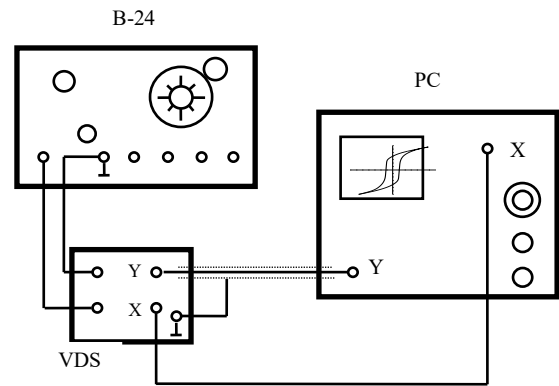


Рис. 1 – Блок-схема стенду по дослідженню петлі діелектричного гістерезису активних діелектриків

Конденсатор C , що досліджується, з'єднаний послідовно з іншим конденсатором C_e (рис. 2) з лінійним (пасивним) діелектриком, наприклад, конденсаторним папіром.

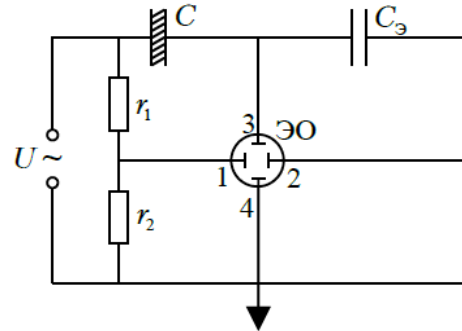


Рис.2 – Принципова схема стенду

У конденсаторів з пасивним діелектриком ємність (відносна діелектрична проникність) не залежить від прикладеної напруги, що справедливо для області слабких електричних полів [7, 8]. Ємність конденсатора C_e постійна і значно більша ємності конденсатора C . Змінна напруга $U~$ подається на послідовно з'єднані конденсатори C (досліджувані зразок) і C_e . Оскільки величина ємності $C_e \gg C$, то $U_C \gg U_e$, і можна вважати, що $U_C \approx U~$.

Напруженість електричного поля в зразку становить

$$E = \frac{U}{d}, \quad (1)$$

де d – відстань між пластинами конденсатора C , що досліджується. Відповідно до (1) на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа (позначено PC – рис. 1 або ЭО – рис. 2) (канал 1) подається напруга U_x , пропорційна напруженості електричного поля E в досліджуваному конденсаторі C .

На вертикально відхиляючі пластини 3 – 4 (канал 2) подається напруга U_y з еталонного конденсатора C_e , пропорційно величині поляризації P . Так як ємності C і C_e з'єднані послідовно, то

$$q = CU_x = C_e U_e, \quad (2)$$

де q – заряд на пластині конденсатора.

З (1) визначається напруга на еталонному конденсаторі C_e

$$U_e = \frac{C \times U_x}{C_e} = \frac{q}{C_e} \cdot \quad (3)$$

Враховуючи, що $q = \sigma S$, де σ – поверхнева щільність заряду, S – площа пластин конденсатора C , то:

$$U_e = U_y = \frac{\sigma \times S}{C_e} \cdot \quad (4)$$

Враховуючи, що вектор поляризації P і поверхнева щільність зарядів дорівнюють одне одному $P = \sigma$ [6], (4) запишеться у вигляді

$$U_e = U_y = \frac{S}{C_e} \times P \cdot \quad (5)$$

Таким чином, з каналу 2 (вертикальна розгортка) подається напруга, пропорційна поляризації діелектрика P .

На екрані ноутбука при повному циклі зміни напруженості поля E спостерігається (у відповідному масштабі) залежність вектора поляризації від напруженості електричного поля $P = f(E)$, тобто петля діелектричного гістерезису.

Апробація стенду по візуалізації петлі діелектричного гістерезису. Перед кожним проведенням вимірів проводиться обов'язкове калібрування осцилографа.

На рис. 3 приведена осцилограма каліброваної напруги прямокутної форми.

На рис. 4 наведено осцилограму – залежність заряду (поляризації) від напруги (напруженості електричного поля) для конденсатора K75 з лінійним діелектриком: залежність між поляризованістю і напруженістю електричного поля – лінійна (верхня частина екрану монітора ноутбука). Підтвердженням лінійності застосовуваних діелектриків в конденсаторах є ідентичність часових залежностей між поляризацією і напруженістю електричного поля (показання каналу 1 і каналу 2) відповідно.

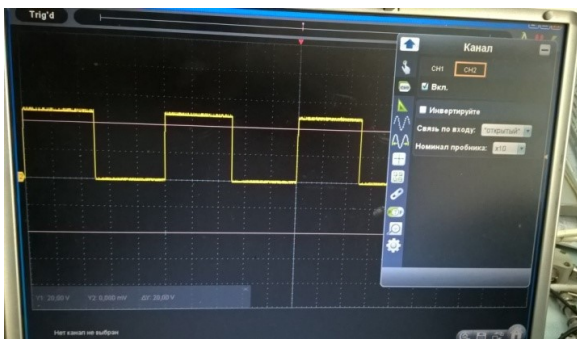


Рис. 3 – Калібрувальний сигнал



Рис. 4 – Типова залежність між поляризацією та напруженістю електричного поля для конденсатора з лінійним діелектриком

При підключенні зразка конденсатора з активним діелектриком (сегнетоелектриком) проявляється нелінійна залежність між поляризацією і напруженістю електричного поля (відставання вектору поляризації від прикладеної напруги, що обумовлено доменною структурою матеріалу конденсатора) (рис. 5).

При збільшенні прикладеної напруги (рис. 6) спостерігається зміна залежності заряду (поляризації) (дивись рис. 7). При деякому значенні напруженості електричного поля всі домени будуть поляризовані в напрямку поля, і поляризація матиме значення насичення. Подальше збільшення поля призведе до лінійного росту поляризації за рахунок індукованої поляризації (індукована поляризація – поляризація, яка виникає завдяки зрушенню іонів відносно один одного, деформації електронних оболонок окремих атомів, молекул, іонів і таке інше).



Рис. 5 – Типова залежність між поляризацією і напруженістю електричного поля для конденсатора з активним діелектриком



Рис. 6 – Показання вольтметра джерела постійної напруги



Рис. 7 – Характер петлі діелектричного гістерезису при збільшенні прикладеної напруги до конденсатора з активним діелектриком

На рис. 8 приведені осцилограми для зразка конденсатора з активним діелектриком, структура і властивості якого відрізняються від попереднього: петля діелектричного гістерезису має трапецієдальну форму.



Рис. 8 – Трапецієдальна форма петлі діелектричного гістерезису зразка конденсатора з активним діелектриком

За допомогою перемикача вибирається паралельна схема заміщення при вимірюванні ємності і тангенса кута діелектричних втрат. Значення результатів вимірювань ємності за паралельної C_p і послідовної C_s схемами заміщення може істотно відрізнятися для конденсаторів з діелектриками, втрати в яких значні [11]:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \delta} \quad (6)$$

На рис. 9 – рис. 11 приведені частотні залежності ємності, тангенса кута діелектричних втрат зразків конденсаторів, що виміряні при температурі 25 °С. Криві 1 – 3 відповідають зразкам конденсаторів з

активним діелектриком, крива 4 – конденсатору КБГ–0,25 мкФ з паперовим діелектриком.

Порівняння частотних залежностей ємності зразків показує, що для зразка під номером 1 з активним діелектриком найбільшою мірою виражена частотна залежність. Для конденсатора з паперовим діелектриком ємність не змінюється в достатньо широкому діапазоні частот (крива 4).

Для зразків конденсаторів з активним діелектриком характерні більш високі значення тангенса кута діелектричних втрат в порівнянні з лінійним діелектриком (порівняй, наприклад, криві 1 і 4): відмінність більш ніж в 10 і 100 разів в залежності від частоти.

Висновки. Розроблено стенд для дослідження електричних властивостей з можливістю візуалізації процесу поляризації осцилографічним методом та визначенням діелектричних втрат в зразках конденсаторів з пасивним та активним діелектриком.

Стенд включає джерело змінного струму В-24, цифровий двоканальний осцилограф VDS з програмним забезпеченням, ноутбук, професійний портативний вимірювач ємності і тангенса кута діелектричних втрат.

Виконано тестування стенду з обов'язковим калібруванням осцилографа для підвищення точності спостереження петлі діелектричного гістерезису.

Отримано осцилограми напруженості електричного поля, поляризації та петлі діелектричного гістерезису для зразків конденсаторів з активним діелектриком. Показано, що залежності суттєво відрізняються для різних матеріалів, що застосовуються в якості діелектрика конденсатора.

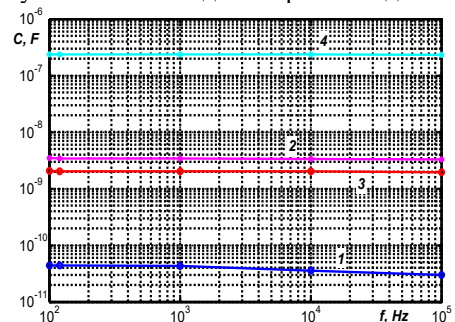


Рис. 9 – Частотні залежності ємності зразків конденсаторів з активним і пасивним діелектриком

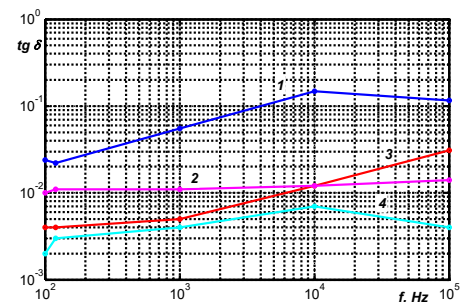


Рис. 10 – Частотні залежності тангенса кута діелектричних втрат зразків конденсаторів з активним і пасивним діелектриком

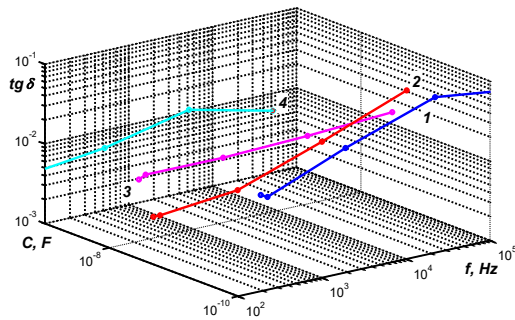


Рис. 11 – $C - tg\delta$ діаграма частотної залежності тангенса кута діелектричних втрат зразків конденсаторів з активним і пасивним діелектриком

Виконанні дослідження частотних залежностей ємності конденсаторів доводять, що для зразка конденсатора з паперовим діелектриком ємність (діелектрична проникність) не змінюється в діапазоні частот 100 Гц – 100 кГц. Для зразків конденсаторів з активним діелектриком в більший мірі спостерігається залежність ємності (діелектричної проникності) в указаному діапазоні частот в залежності від діелектрика конденсатора.

На основі аналізу частотної залежності тангенсу кута діелектричних втрат зразків конденсаторів встановлено, що діелектричні втрати в конденсаторах з активним діелектриком більше ніж в 10 разів вище, ніж в конденсаторі з паперовим діелектриком, який є пасивним полярним матеріалом. Так, на частоті 10 кГц тангенс кута діелектричних втрат становить 15% і 0,6% для конденсаторів з активним та пасивним діелектриком відповідно.

Список літератури

1. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики (основные свойства и применение в электронике). – М.: Радио и связь, 1989. 288с.
2. Физика активных диэлектриков: учебное пособие / под ред. Сахненко В.П. / Поплавко Ю.М., Переверзева Л.П., Раевский И.П. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 480 с.
3. Электреты / Под ред. Сеслерра Г. – М.: Мир. – 1983. – 487 с.

4. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. – М.: Мир, 1981.
5. Лучицкий Р. М., Галушак М. О. Фізика твердого тіла: Навч. посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2008. – 250 с.
6. Беспрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях // Техническая электродинамика. – Київ, 2010. – № 6. – С. 23 – 29.
7. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. – М.: Издательство иностранной литературы: Ред. литературы по вопросам техники, 1960. – 439 с.
8. Сканави Г. И. Физика диэлектриков, область слабых полей. – М.; Л.: ГИТТЛ, 1949. – 500 с.
9. Сканави Г. И. Физика диэлектриков, область сильных полей. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.
10. Беспрозванных Г.В., Гаврилюк І.Ю. Стенд для дослідження властивостей активних діелектриків // Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції. – 2019, Ч. II. с.134.
11. Беспрозванных А. В. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций / А. В. Беспрозванных, Б. Г. Набока // Навчальний посібник. – Харків, НТУ «ХПІ». – 2012. – 108 с.

References (transliterated)

1. Res I.S., Poplavko Yu.M. Dielectrics (basic properties and applications in electronics). - M.: Radio and communication, 1989. 288p.
2. Physics of active dielectrics: a textbook / ed. Sakhnenko VP / Poplavko Yu.M., Pereverzev L.P., Raevsky IP - Rostov N / A: Publishing House of the SFU, 2009. – 480 p.
3. Electrets / Ed. Cesslerra G. – M.: The World. - 1983. - 487 p.
4. Lines M., Glass A. Ferroelectrics and Related Materials. - M.: Mir, 1981.
5. Luchitsky R.M., Galushchak M.O. Solid state physics: Nauch. manual. – Ivano-Frankivsk: Torch, 2008. - 250 p.
6. Besprozvannykh A.V. Strong electric field and partial discharges in multicore cables // Technical electrodynamics. - Kiev, 2010. – no 6. – pp. 23 - 29.
7. Hippel A.R. Dielectrics and waves. – M.: Publishers of Foreign Literature: Ed. Literature on Engineering, 1960. – 439 p.
8. Skanavi G.I. Physics of dielectrics, the field of weak fields. - M.; L.: GITTL, 1949. – 500 p.
9. Skanavi G.I. Physics of dielectrics, the field of strong fields. - M.: GIFML, 1958. – 907 p.
10. Besprozvannykh G.V., Gavriluk I.Yu. A stand for the study of the properties of active dielectrics // Abstracts of the XXVIII International Scientific-Practical Conference. – 2019, H. II. p.134.
11. Besprozvannykh G.V. Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizolyatsionnykh konstruksiy/ G.V.Besprozvannykh, B.G.Naboka // Navchal'niy posibnik. – Kharkiv, NTU «KhPI». – 2012. – 108 p.

Надійшло (received) 28.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Безпрозваних Ганна Вікторівна (Безпрозванных Анна Викторовна, Ganna Bezprozvannych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, тел. (057) 707 – 60-10; e-mail: bezprozvannych@kpi.kharkov.ua.

Кессаєв Олександр Геннадійович (Кессаев Александр Геннадьевич, Olexandr Kiessaiev) – кандидат технічних наук, старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри теоретичних основ електротехніки, тел. (057) 707 – 69-61; e-mail: akess@ukr.net

Гаврилюк Ігор Юрійович (Гаврилюк Игорь Юрьевич, Igor Havrylyuk) – магістр за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізації «Електроізоляційна, кабельна та оптоволоконна техніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел. (057) 707 – 60-10;.